

# ВІД ЧОГО ЗАЛЕЖИТЬ ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛИСТКОВОГО УДОБРЕННЯ РОСЛИН

Ірина Логінова, консультант із живлення рослин;  
Ольга Капітанська, начальник наукового відділу;  
Сергій Полянчиков, директор із розвитку НВК «Квадрат»

Поглинання елементів живлення листком принципово відрізняється від кореневого живлення: при поглинанні коренем відбувається активний і, що дуже важливо, селективний з боку рослини процес проникнення елементів у клітину кореневого волоска. Водночас проникнення сполук у клітини листка є більш пасивним по відношенню до рослини процесом, у якому особливого значення набувають властивості самого розчину, зовнішні умови та характеристики епідермісу листка. Отже, розуміння останніх дуже важливе для ефективного використання позакореневого підживлення рослин.

Листкове удобрення рослин можна умовно поділити на окремі стадії, де ті чи інші чинники та характеристики відіграють ключову роль: (1) формування краплі під час обприскування, (2) політ краплі, її розподіл по площі поля та контакт із поверхнею листка, (3) проникнення елементів живлення крізь кутикулу та інші структури епідермісу, (4) дифузія речовини всередині рослини, проникнення у клітину і, врешті, (5) участь у різних біохімічних процесах (Schönherr, Baur, Buchholz, 1999).

Отже, зрозуміло, що до властивостей розчинів листкових добрив висуваються принципово інші вимоги, ніж до ґрунтових добрив. Не беручи до уваги властивості, необхідні для приготування розчинів і бакових сумішей та власне розпилення їх на листок, ми зупинимось на характеристиках, важливих саме для проникнення добрив усередину листка. Адже саме проникнення через кутикулу всередину листка є першим і голо-

вним бар'єром на шляху елементів живлення від розчину добрив до зміни у біохімічних процесах.

Чинники, які впливають на проникнення добрив у листок, можна умовно поділити на три групи (Fernandez et al., 2020):

1) Характеристики самого добрива і робочого розчину (хімічний склад, електричний заряд, рН, поверхневий натяг, молекулярна маса, гігроскопічна точка, утримання, розпилення, тощо);

2) Чинники довкілля (температура, відносна вологість, світло – головні чинники, які впливають на поглинання і перерозподіл елементів живлення листкового добрива, визначаючи як відклик рослини, так і зміни самого добрива);

3) Чинники, пов'язані власне з рослиною (фізіологія, анатомія рослин, фенологічна фаза, склад і структура поверхні листка, включаючи склад кутикули, архітектуру поверхневого воску, наявність листкових волосків, мобільність елементів усередині рослини, реакція на абіотичні стреси тощо).

Усі ці чинники взаємодіють між собою, впливаючи на поглинання та перерозподіл елементів живлення листкових добрив і визначаючи, врешті, відклик рослин.

## ГІГРОСКОПІЧНІСТЬ І ГІГРОСКОПІЧНА ТОЧКА СОЛЕЙ ДОБРІВ

**Гігроскопічність** визначається як здатність речовини поглинати й утримувати вологу з атмосфери. Для розчинних речовин, наприклад солей, процес поглинання вологи з повітря відбувається до моменту, коли кристалічна тверда речовина розчиняється у поглинутій волозі й утворює розчин – таке явище називається розпливанням. Це відбувається за значення відносної вологості повітря, вищого за кри-

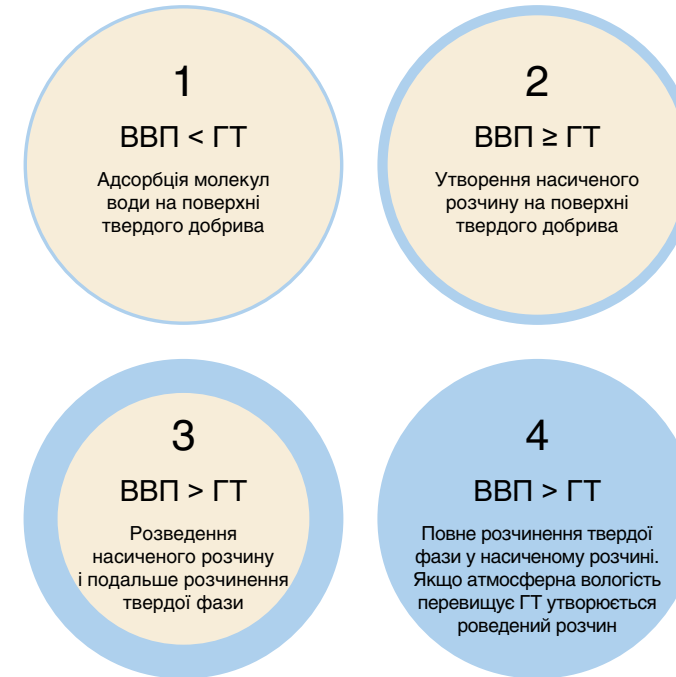


Рис. 1. Ілюстрація поступового розпливання твердої фази добрива: ГТ – гігроскопічна точка, ВВП – відносна вологість повітря; блакитний колір вказує на розчинену фазу, сірий – на тверду (Sigtryggsson (2018). За матеріалами Mauer, Taylor (2010)

тичну – це **гігроскопічна точка (ГТ)**, яка у англійській літературі часто позначається як POD – Point of deliquescence або DRH – Deliquescence relative humidity. Гігроскопічна точка специфічна для кожної речовини та хімічної суміші (Khvorostyanov, Curry, 2014). Інакше кажучи, ГТ є показником відносної вологості повітря, при перевищенні якої тверде добриво починає розчинятися у адсорбованій із повітря волозі.

На відміну від гігроскопічності, яка є властивістю сполук поглинати вологу з повітря, здатність до розпливання включає не тільки саме поглинання вологи, а й утворення водного розчину (тобто відбувається фазова трансформація із твердої речовини у розчин).

Про розпливання гранульованих добрив добре відомо, адже ця властивість обмежує приготування деяких тукосумішей та погіршує їх використання. З цією метою гранули покривають спеціальними речовинами, а також визначають умови зберігання. Отже, для твердих добрив ця характеристика небажана.

Для позакорневих добрив, навпаки, здатність до розпливання – важлива з точки зору ефективності проникнення їх у листок. Адже проникнення сполук через кутикулу є

суто фізичним процесом і потребує, щоб сіль була у розчиненому стані або щонайменше у стані насиченого розчину. Після нанесення на листок розчин добрива поступово проникає всередину, а решта – за низької вологості повітря (нижчої за ГТ) висихає, внаслідок чого на поверхні кутикули утворюється залишок компонентів добрива. Подальші гідратація та розчинення солей визначаються показником гігроскопічної точки та відносною вологістю повітря (Schönherr, Luber, 2001).

Зрозуміло, що з точки зору розпливання, найкращою для листкового внесення буде та сіль, для якої ГТ має нижче значення. У дослідженнях з ізольованою кутикулярною мембраною (Schönherr, 2002) було встановлено пряму залежність між показником ГТ і часом дифузії солі крізь кутикулу за змінної відносної вологості повітря: що вища відносна вологість повітря порівняно з ГТ, то швидшим є проникнення солі. Звісно, тут потрібно брати до уваги й набухання самої кутикули за підвищення вологості, що також є суто фізичним процесом. Проте головним впливом вологості є розчинення залишків добрива на поверхні кутикули.

Наприклад,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , маючи показник ГТ 54%, за показників атмосферної вологості 54% і вище буде розпливатись (а, отже, поглинатись листком), тоді як для розпливання хлориду кальцію  $\text{CaCl}_2$  необхідна вологість, яка перевищує лише 33%. Або для розпливання солі  $\text{K}_2\text{SO}_4$  буде необхідна відносна атмосферна вологість понад 98%, тоді як для деяких сполук калію з органічними кислотами достатньо набагато нижчої.

Важливо також сказати про боровмісні добрива: для підвищення розчинності й біодоступності бору при позакореному внесенні часто використовують його композиції з моноетаноламіном. Ці сполуки повністю розчинні у воді та рідких НРК добривах, не містять баластних речовин і токсичних домішок, що зводить до мінімуму ризик фітотоксичності й опіків листків. Ці

Таблиця 1. Гігроскопічна точка для сполук, які використовують для позакореневого внесення, за температури 20–25°C (Джерела: Lide, 1991; Schönherr, 2002; Zamora et al., 2011; Arezki, 2016; Moore et al., 2019; інші)

Сполука	Гігроскопічна точка (ГТ)	Сполука	Гігроскопічна точка (ГТ)
$\text{NH}_4\text{NO}_3$	63	$\text{MgCl}_2$	33
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	80	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	56
Сечовина	75	$\text{MgSO}_4$	90
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	70	$\text{ZnSO}_4$	87
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	65	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	42
KCl	86	FeCl <sub>3</sub>	59
$\text{KNO}_3$	93	FeCl <sub>2</sub>	44
$\text{K}_2\text{SO}_4$	98	$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$	54
$\text{K}_2\text{CO}_3$	44	$\text{FeSO}_4$	95
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	95	$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$	42
$\text{K}_2\text{HPO}_4$	45	$\text{MnSO}_4$	87
$\text{CaCl}_2$	33	$\text{MnCl}_2$	60
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	56	$\text{H}_3\text{BO}_3$	98



ДОБР

Ад'юванти дають змогу знижувати гігроскопічну точку добрива, завдяки чому елементи живлення більш ефективно проникають всередину листка навіть за низької відносної вологості повітря

поліборатні органічні комплекси забезпечують відмінні зволожуючі та вологоутримуючі властивості, сприяють рівномірному покриттю листової поверхні та проникненню бору в рослину.

Зокрема, це досягається значно нижчим значенням гігроскопічної точки боретаноламіну порівняно з борною кислотою. Адже ГТ борної кислоти становить 98%, тобто за більшості умов літа нанесений на листок розчин борної кислоти висихатиме, а для його повторного розчинення необхідно, щоб відносна вологість повітря перевищувала 98%, а це трапляється досить рідко.

Крім атмосферної вологи, розчиненню добрива на поверхні листка сприяє випадіння роси, що залежить від коливання денної та нічної температур, рельєфу місцевості й відносної вологості повітря. Відтак узгодження часу внесення листових добрив по відношенню до точки роси важливе для максимізації поглинання елементів живлення листком.

Отже, під час вибору добрив для позакореневого внесення необхідно зважати на ГТ та середню відносну вологість повітря у конкретному регіоні. Кліматичні дослідження в Україні свідчать про зменшення відносної вологості повітря з північного заходу до південного сходу. І хоча згідно із прогнозом

Укргідрометцентру (2013), зміни середньої відносної вологості повітря до 2050 року будуть несуттєвими ( $\pm 3\%$  для місячних значень та  $\pm 1\%$  для річних), екстремально низька вологість повітря фіксуватиметься дедалі частіше. Випадки аномально низької вологості (нижче за 30%) спостерігаються і в останні роки. З огляду на це, знання про гігроскопічну точку набувають іще більшої актуальності.

Отже, кожне добриво має свою критичну відносну вологість повітря, нижче за яку добриво висихатиме на листовій поверхні, відповідно, процес поглинання діючих речовин припинятиметься. Ця величина залежить не лише від властивостей самого добрива, а й від наявності спеціальних добавок – ад'ювантів.

### ЗНАЧЕННЯ АД'ЮВАНТІВ

Ад'юванти здатні модифікувати характеристики добрива, даючи змогу змінити характер внесення робочого розчину, поводження краплі добрива на поверхні листка та його дифузію крізь кутикулу за рахунок покращення властивостей змочування, розтікання, утримання, проникнення і зволоження.

Для збільшення часу висихання розчину добрива на листку використовують вологоутримуючі агенти (**гумеканти**). Найчастіше

це гігроскопічні речовини, які погано висихають (наприклад, солі амонію та сечовини) або після випаровування води залишаються у рідкому стані (різноманітні поліолі чи їх похідні, гліцерин, етиленгліколь, пропіленгліколь та інші).

Для покращення проникності розчину через кутикулу використовують **пенетранти**. Вони являють собою органічні розчинники, мінеральні оливи, олії або їх суміші. Механізм дії пенетрантів можна пояснити розм'якшенням або точковим розчиненням кутикулярного воску, під час якого забезпечується переміщення робочого розчину під дією сил капілярності.

**Сурфактанти** (поверхнево-активні речовини) збільшують контакт краплі з поверхнею листка, що підвищує адсорбцію добрива за рахунок рівномірного покриття, покращеного утримання краплі, збільшення проникнення через продири, трихоми або інші структури епідермісу, запобігання кристалізації нанесеного розчину.

Отже, окрім інших впливів, ад'юванти дають змогу знижувати гігроскопічну точку добрива, завдяки чому елементи живлення більш ефективно проникають всередину листка навіть за низької відносної вологості повітря. Це має дуже важливе практичне значення.

Крім ад'ювантів, поширеною практикою є застосування **карбаміду** як своєрідного «провідника» інших компонентів бакової суміші у листок.

Так, у літературі описано вплив додавання сечовини до розчину солей мікроелементів, зокрема, до солей цинку, на поглинання останніх листком. У низці досліджень додавання сечовини підвищувало поглинання (Glauke, 1982), тоді як у інших не було встановлено ніякого впливу (Haslett et al., 2001).

Проте в метааналізі даних, виконаному компанією *Compass Minerals Manitoba* (2014), зазначається, що у наведених вище дослідженнях не фіксували вологість повітря під час застосування. У регіоні, де карбамід чинив позитивний вплив на поглинання, середня вологість повітря в середньому сягає 94%, тоді як у місці проведення досліду, де карбамід не був ефективним, – у середньому нижче ніж 50%. В останньому випадку процес поглинання елементів листком зупинявся внаслідок низької вологості. І це дуже

важливо брати до уваги, тому що за певних умов додавання карбаміду до робочого розчину може, навпаки, підвищувати ГТ бакової суміші, зменшуючи ефективність її поглинання листком.

Це ж саме стосується і сульфату магнію, який також є частим «супутником» бакових сумішей листових добрив. Адже показник ГТ для нього становить аж 90%. Тому необхідно звертати увагу на компоненти бакової суміші з огляду саме на зміну гігроскопічної точки усього розчину.

### РІЗНІ ШЛЯХИ ВСЕРЕДИНУ

Хоча кутикула, власне, є основним бар'єром на шляху надходження поживного розчину, це не єдиний шлях проникнення добрив усередину листка. Шляхом масового току або пасивної дифузії розчини поживних речовин проходять крізь кутикулярні пори або дефекти та модифіковані структури епідермісу – продири, трихоми, ектодесмати чи сочевички. Як альтернативний шлях транскутикулярного переносу заряджених частинок (електролітів) розглядаються заповнені водою пори – аквапори.

Варто зазначити, що важливість того чи іншого шляху елементів живлення у листок специфічна для різних видів рослин. Так, наприклад, дослідженнями *Li et al.* (2018) за допомогою синхротрону та методу рентгенофлуоресцентної мікроскопії ( $\mu$ -XRF) встановлено, що у рослин соняшнику при позакореновому поглинанні цинку особливо важливі

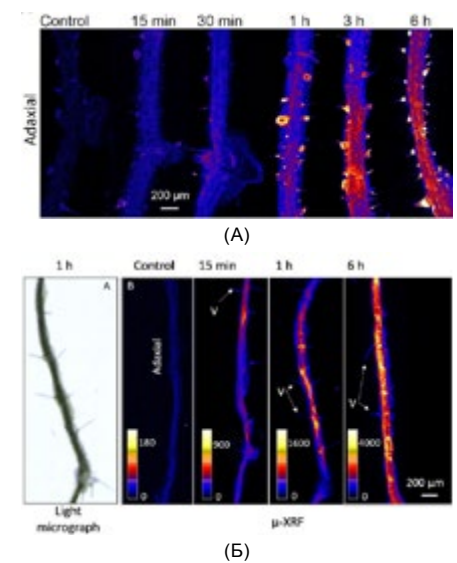


Рис. 2. Розподіл Zn у тканинах листку соняшнику (А) та сої (Б)

Таблиця 2. Показники сольового індексу й осмоляльності деяких добрив (Clapp, 2007)

Добриво	Сольовий індекс, од.	Осмоляльність, ммоль/кг
Аміачна селітра	104	1804
Натрієва селітра	100	4092
Карбамід	74,4	1018
КАС-28	64,6	1439
Калієва селітра	69,5	3434
Сульфат амонію	68,3	2314
Діамоній фосфат	29,2	2054

незалозисті (покривні) трихоми. При цьому Zn швидко накопичувався в основі трихом адаксіальної (верхньої) поверхні (рис. 2А).

А подібні дослідження, проведені на сої і томатах (*Li et al.*, 2017) виявили, що при позакореновому застосуванні  $ZnSO_4$  для цих культур трихоми не мали вирішального значення у поглинанні. При цьому Zn накопичувався переважно у жилках, а також у міжжилкових тканинах (рис. 2Б)

Потрібно також зауважити, що поглинання листком хелатованих мікроелементів відрізняється від солей, адже органічні ліганди навколо хелатованого мікроелемента можуть проникати у восковий шар, підвищуючи поглинання металу. Тому хелатовані форми мікроелементів набагато ефективніші навіть за нижчих норм (Schaffer et al. 2011).

### А ЯК БУТИ З ТОКСИЧНІСТЮ?

Пасивна природа процесу поглинання речовин листком має також іще один важливий наслідок: будь-яка субстанція, присутня на поверхні листка, буде проникати через неї так довго, як буде підтримуватись градієнт концентрації – рушійна сила дифузії (Fallahi, Eichert, 2013).

Висока здатність добрива до розпливання, крім позитивного у плані ефективності добрива, має також інший аспект: якщо рівень проникнення дуже високий і не відповідає метаболізму рослини, це викличе ураження листка («опіки»). Адже більш швидке поглинання елементів із низькою ГТ може спричинити більше ураження листків за високої концентрації.

Потенційну можливість ураження рослин стартовими добривами (внесені у безпосередньому контакті з насінням) оцінюють за показником сольового індексу. Проте для листових добрив зробити правильні висновки на основі цього показника

важко: наприклад, показник сольового індексу для КАС-28 нижчий за карбамід, проте останній набагато безпечніший за листового внесення (Clapp, 2007).

За класичним методом визначення сольового індексу добрива, аналіз включає взаємодію добрива з ґрунтом. Але у випадку листового добрива відбувається безпосередній контакт добрива з рослиною.

Тому *Murray et al.* (2007) запропонували новий метод оцінки можливості ураження листків добривами: показник **осмоляльності (osmolality)**, який визначають методом осмометрії парової фази і виражають у ммоль/кг. Що нижчим є показник осмоляльності, то менший ризик ураження листків.

Отже, осмоляльність – іще одна характеристика добрив для позакореневого внесення, яку необхідно брати до уваги під час підбору оптимальної дози та композиції листового добрива, щоб уникнути опіків самих листків.

Підсумовуючи все сказане вище, потрібно зазначити, що попри принципову відмінність листового живлення від кореневого, для нього діють ті ж самі правила ефективного менеджменту: необхідно правильно підібрати склад суміші, визначити правильну норму елементів живлення, правильно врахувати зовнішні умови і правильно оцінити потреби рослини.

Розуміння принципів фоліарного проникнення добрив має вплив на практичне використання позакореневого підживлення рослин. Знання про здатність добрив до розпливання (гігроскопічні точки), про особливості та механізми поглинання мають бути основою для розробки та виробництва ефективних листових добрив і біостимуляторів. Тільки такий науковий підхід дасть можливість виробникам виробляти добрива, що відповідають сучасним вимогам рослинництва. 🌱